

**Surface Fatigue Resistance
with Induction Hardening**

100-111
11-8
043534

Induction hardening has been used for some years to harden the surface and improve the strength and service life of gears and other components (1 and 2). Many applications that employ induction hardening require a relatively long time to finish the hardening process and controlling the hardness of the surface layer and its depth often was a problem. Other surface hardening methods -- for example, carbonizing -- take a very long time and tend to cause deformations of the tothing, whose elimination requires supplementary finishing work. In double-frequency induction hardening (3), one uses a low frequency for the preheating of the toothed wheel and a much higher frequency for the purpose of rapidly heating the surface by way of surface hardening.

TECHNICAL PUBLICATION PROCESSING INFORMATION

BRANCH ORG. CODE 5950		DIVISION NAME STRUCTURES AND ACOUSTICS		NASA CONTRACT MANAGER (First, middle initial, last name)		PHONE NO.																									
AUTHOR(S) (First, middle initial, last name) DENNIS TOWNSEND 1 ALAN TURZA 2 MIKE CHAPMAN 2		PHONE NO. 3955		PERFORMING ORGANIZATION (Name and complete address)		MAIL STOP																									
		MAIL STOP 77-10				ROOM NO.																									
		ROOM NO. 122				CONTRACT OR GRANT NO.																									
AUTHOR(S) AFFILIATION (Indicate affiliation of each author)				REPORT TYPE (Defined on back)		SUBJECT CATEGORY(IES)																									
☒ Lewis Research Center ☒ Contractor ☐ Grantee ☐ National Research Council-NASA Research Associate ☐ Resident Research Associate ☐ Summer faculty fellow ☐ Summer intern ☐ Army ☐ ICOMP ☐ Other (Specify) _____				LOW DISTRIBUTION REPORTS ☐ HTM ☐ HTM Presentation ☐ HCR ☐ HCR Presentation ☐ Pres. only (no printing) ☒ Journal ☐ CP Paper (from NASA CP)		37 TASK NO. YCH5058 RTOP NO. 581-30-13																									
TITLE AND SUBTITLE RESISTENZA A FATICA SUPERFICIALE CON LA TEMPRA A INDUZIONE				CLASSIFICATION ☐ SECRET ☐ CONFIDENTIAL ☒ UNCLASSIFIED		IF ARMY FUNDED (Check one) ☐ 1L161102AH45 ☐ 1L162211A47A DOE Interagency Agrmt. No. UC No.																									
MEETING: TITLE, SPONSOR, LOCATION, AND DATE JOURNAL: TITLE, PUBLISHER (For foreign sponsored meetings/journals attach FF427) ORGANIDI TRASMISSIONE				DISTRIBUTION APPROVAL (FEDD, SBIR, ITAR, and EAR defined on back)																											
ARE ANY TRADE NAMES USED? ☐ YES ☒ NO				☒ Publicly Available ☐ Limited Distribution Date for general release _____ ☐ FEDD Time limitation if other than 2 years _____ ☐ SBIR ☐ Publicly Available ☐ Limited (date for release) _____																											
KEYWORDS GEARS, FATIGUE INDUCTION HARDENING TEST				NASA RESTRICTED DISTRIBUTION DOCUMENT: ☐ ITAR (Attach FF427) ☐ EAR (Attach FF427) ☐ U.S. Government agencies and U.S. Government agency contractors only ☐ NASA contractors and U.S. Government agencies only ☐ U.S. Government agencies only ☐ NASA personnel only ☐ NASA personnel and NASA contractors only ☐ Available only with approval of issuing office: _____																											
TECHNICAL REVIEWS AND APPROVALS				BRANCH CHIEF'S NAME AND SIGNATURE DATE 12/23/96																											
<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>DATE IN</th> <th>DATE APPROVED</th> <th>INITIALS</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Division Chief</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Branch Chief</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>TRC Chair or Reviewer</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Branch Chief</td> <td></td> <td>12/23/96</td> <td>JSC</td> </tr> <tr> <td>Division Chief</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>					DATE IN	DATE APPROVED	INITIALS	Division Chief				Branch Chief				TRC Chair or Reviewer				Branch Chief		12/23/96	JSC	Division Chief				DIVISION CHIEF'S NAME AND SIGNATURE DATE _____			
	DATE IN	DATE APPROVED	INITIALS																												
Division Chief																															
Branch Chief																															
TRC Chair or Reviewer																															
Branch Chief		12/23/96	JSC																												
Division Chief																															
				TECHNICAL REVIEW COMMITTEE (Required for high distribution reports)																											
				NAME DIVISION																											
				CHAIR OR REVIEWER																											
				CHECKER																											
				ADVISOR																											
				AUTHOR'S DISTRIBUTION LABELS																											
				☐ NONE ☐ ATTACHED ☐ TO BE PROVIDED																											
				FIGURES ONLY		MATS																									
				QTY. EACH _____		☐ BY AUTHOR ☐ BY LTID																									
				DEADLINE _____		DEADLINE _____																									
						PRINTED COPIES																									
						QTY. _____																									
						DEADLINE _____																									
☐ EDITING REQUESTED ☒ CREDIT DIVISION FOR AUTHOR WORK ONLY (NO PRINTING)				FOR PUBLISHING SERVICES COORDINATION OFFICE USE ONLY E- 9808-1 AIAA- _____ PRINTING OFFICER'S APPROVAL _____ ICOMP- _____ REPORT NO. _____ DATE _____ CMOTT- _____																											

ORGANI DI TRASMISSIONE

comandi e azionamenti

asst
ORGANO UFFICIALE
ASSOCIAZIONE ITALIANA
CONTRUTTORI
ORGANI DI TRASMISSIONE

In questo numero

Ingranaggi
**Tempra
a induzione
e fatica
superficiale**



Ingranaggi
**Il contatto
fra dentature
molto
deformabili**

Trasmissioni
**La catena
guidata**

Dossier
motori elettrici
**Tecnologie,
controlli,
azionamenti**



**INVERTER DI PICCOLA POTENZA
PER INGRANAGGI**

400-740-15-25-40-60-90-150 W

ALIMENTAZIONE

220 V 50/60 Hz monofase
220-380-440 V 50/60 Hz trifase



INVERTER "INVERTER"

ALIMENTAZIONE

220 V 50/60 HZ monofase
220-380-460 V 50/60 Hz trifase



CERCASI AGENTI PER ZONE LIBERE

Tel. 031/756625 - Fax 031/756633

Numero 9 - ottobre 1996



IN COPERTINA

C.M.V. sas

Viale Repubblica, 73/7
22060 Cabiato (CO)
Tel. (031) 756625
Fax (031) 756633

Segnare 127 cartolina servizio informazioni

ATTUALITÀ

UNA «ENCICLOPEDIA» PER GLI INGRANAGGI **36**

a cura della redazione

ATTRITO E USURA

TRIBOLOGIA DI RIPORTI POLIMERICI. 2ª PARTE:
PROVE AL BANCO OLEIDRAULICO DI GIUNTI **42**

Nunzio D'Addeo, Luigi Giannotti

INGRANAGGI

IL CONTATTO FRA DENTATURE MOLTO DEFORMABILI **56**

Carlo Gorla

RESISTENZA A FATICA SUPERFICIALE CON LA TEMPRA A INDUZIONE **66**

Dennis Townsend, Alan Turza, Mike Chaplin

TRASMISSIONI

LE CARATTERISTICHE DELLA CATENA GUIDATA **92**

Yixin Wang, Honghai Chen, Xuemin Shui

UNA CATENA DI VANTAGGI **102**

Stewart Daykin

COMPONENTI

AUMENTA LA POTENZIALITÀ D'IMPIEGO DEI RIDUTTORI A VITE SENZA FINE **108**

Heinz Vos

«PACKAGE» DI CUSCINETTI A RULLI CONICI PER AUTOCARRI MODULARI **116**

Niklas Wetteskog

TECNOLOGIA

SVILUPPO DEI CUSCINETTI PER MOTORI DI TRAZIONE **122**

Gottfried Kure

MOTORI ELETTRICI *Dossier*

LA GUERRA DEL PREZZO **130**

G.L.S. Ricci

PRODUZIONE CONTROLLATA DI ENCODER **137**

Glauro Ricci

LA TECNOLOGIA BRUSHLESS **146**

Leslie Rivara

AZIONAMENTI A CONTROLLO DIGITALE **154**

Luca Rocchi

I MOTORI LINEARI PER LA MACCHINA UTENSILE **164**

Enzo Santoro

GESTIONE

CULTURA DELLA QUALITÀ O QUALITÀ DELLA CULTURA? **176**

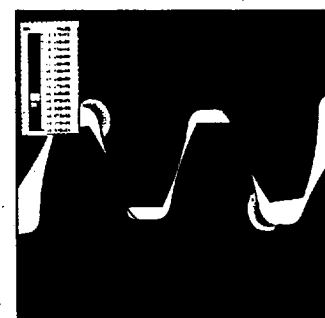
Aldo Ricci

RUBRICHE

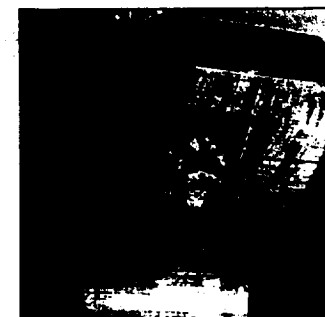
EDITORIALE di Piermaria Davoli	8
GLI APPUNTI di Giovanni Castellani	10
FATTI a cura di Alessandra Paoli	12
CATALOGHI a cura di Gioia Ricordi	22
RECENSIONI a cura di Francesca Predetti	26
MAPPAMONDO a cura di Mario Guagliano	30
L'ABC DEI GIUNTI DI TRASMISSIONE Michael M. Calistrat	75
Giunti con elastomeri in compressione	
IMPARARE DALLE ROTTURE a cura di Shin-ichi Nishida	84
Migliorare la resistenza dei bulloni	
UTENSILI & LAVORAZIONI Gianfranco Bianco	172
Creatori per alberi scanalati	188
VETRINA a cura di Beatrice Gasco	200
AGENDA a cura di Lorenzo Piano	202
PICCOLI ANNUNCI a cura di Federico Garavaglia	



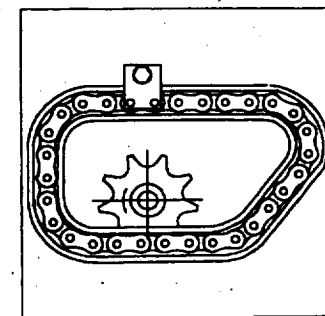
Si conclude con le prove al banco la trattazione sui riporti polimerici. A pag. 42.



Modellazione del contatto di dentature molto deformabili e tolleranze di lavorazione. A pag. 56.



La resistenza degli ingranaggi temprati superficialmente a confronto con quelli cementati. A pag. 66.



Caratteristiche e applicazioni delle trasmissioni a catena guidata. A pag. 92.

Organi di trasmissione su Internet

Volete comunicare con la nostra redazione? Ora è possibile farlo anche attraverso Internet. L'indirizzo di posta elettronica è il seguente:

orgtrasm@tecnet.it

Se volete visitare il Web server di Tecniche Nuove l'indirizzo giusto è:

http://www.tecnet.it

RESISTENZA A FATICA SUPERFICIALE CON LA TEMPRA A INDUZIONE

IN QUESTO ARTICOLO VIENE CONFRONTATA LA RESISTENZA A FATICA SUPERFICIALE DI INGRANAGGI CEMENTATI E TEMPRATI SUPERFICIALMENTE COL METODO DELLA DOPPIA FREQUENZA

Dennis Townsend,
NASA Lewis Research
Center
Cleveland, Ohio, Usa

Alan Turza
Reliance Electric
Greenville, SC, Usa

Mike Chaplin
Contour Hardening Inc.
Indianapolis, IN, Usa

La tempra a induzione viene usata da diversi anni per indurire la superficie e migliorare la resistenza e la durata di ingranaggi e di altri componenti [1 e 2]. Molte applicazioni che impiegano la tempra a induzione richiedono un tempo relativamente lungo per portare a termine il processo di indurimento e il controllo della durezza dello strato superficiale e della sua profondità è stato spesso un problema. Altri metodi di indurimento superficiale, per esempio la cementazione, richiedono tempi molto lunghi e tendono a provocare deformazioni della dentatura, la cui eliminazione richiede lavorazioni supplementari di finitura. Nella tempra per induzione a doppia frequenza [3] si impiega una bassa frequenza per il preriscaldamento della ruota dentata e una frequenza molto più alta per riscaldare rapidamente la superficie per l'indurimento superficiale. Quindi la ruota viene subito raffreddata bruscamente, ottenendo una superficie indurita e buone proprietà del cuore con piccolissime deformazioni. Il processo a doppia frequenza provoca anche una certa tensione residua a compressione nello strato superficiale indurito che migliora la resistenza a flessione e la resistenza a fatica

della superficie del materiale. La tempra per induzione a doppia frequenza è molto interessante per l'industria degli ingranaggi perché rende estremamente più rapido il processo produttivo.

L'aumentata tensione residua di compressione della superficie dovrebbe assicurare una resistenza a fatica della superficie stessa e una buona resistenza a fatica a flessione [4 - 7]. Se con il processo di tempra per induzione a doppia frequenza si ottiene un miglioramento delle caratteristiche superficiali e di resistenza a flessione, si realizza un incremento della durata e dell'affidabilità dell'ingranaggio.

Gli obiettivi del lavoro di ricerca descritto in questo articolo sono: (1) studiare gli effetti della tempra superficiale per induzione a doppia frequenza della dentatura sulla resistenza a fatica della superficie di ingranaggi cilindrici a denti dritti in acciaio AISI 1552, e (2) confrontare la durata degli ingranaggi temprati per induzione con quella di ingranaggi in acciaio AISI 9310 cementati, temprati e rettificati. Per raggiungere questi obiettivi è stato costruito un certo numero di ruote dentate utilizzando un acciaio colato sottovuoto con elettrodo annegato AISI 9310, proveniente da un'unica colata; le ruote so-

no state successivamente cementate, temprate e rettifiche. Un secondo gruppo di ruote è stato costruito con acciaio AISI 1552. Questo gruppo di ruote è stato trattato termicamente, con una durezza a cuore Rc 34-38 e successivamente rettificato. Dopo l'operazione di rettifica, le ruote sono state temprate in superficie con il metodo per induzione a doppia frequenza a una durezza superficiale Rc 60 e a profondità dello strato indurito di 0,635 mm.

Apparecchiatura, campioni e procedure

Banco prova ingranaggi

Le prove di fatica sugli ingranaggi sono state effettuate sul banco prova ingranaggi del Lewis Research Center della NASA (figura 1). Questo banco di prova utilizza il principio del circuito chiuso per l'applicazione del carico all'ingranaggio di prova; il motore deve vincere solo le perdite per attrito del sistema. In figura 1(b) viene presentato uno schema di questo banco prova. L'olio in pressione viene inviato alle palette di carico attraverso anelli di tenuta sull'albero. Quando si aumenta la pressione dell'olio sulle palette di carico,

l'ingranaggio di prova, che trasmette il carico (di cui la pressoria tiene una parte) di segr...

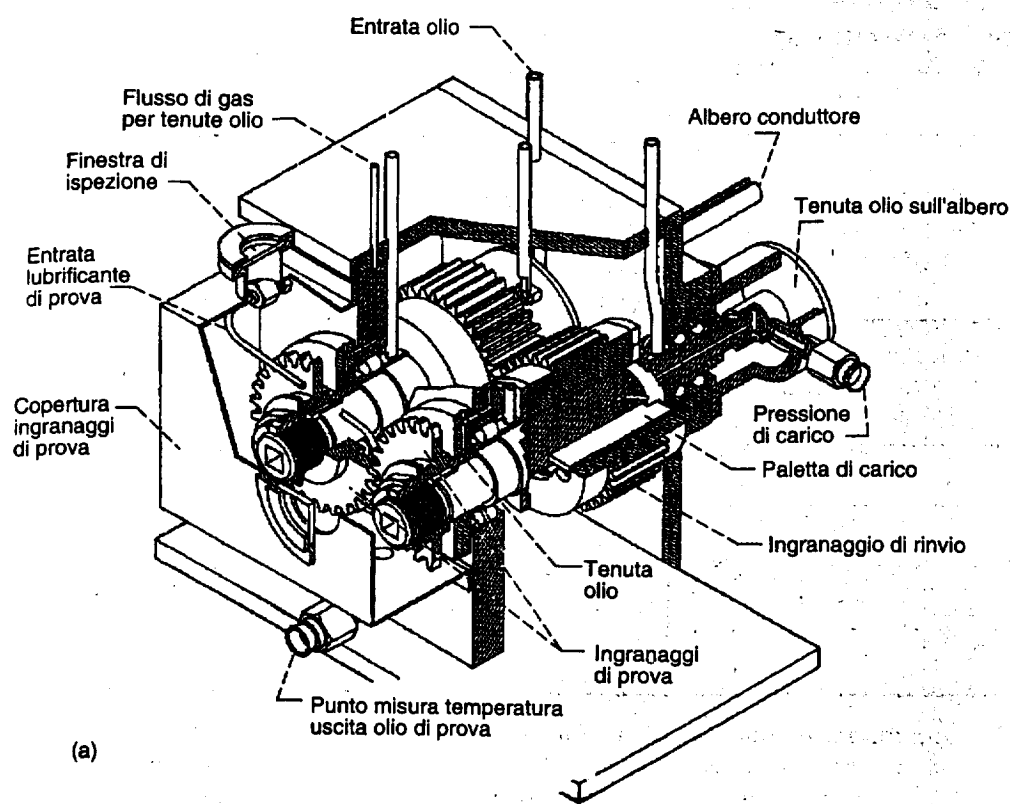
LE
NE

sivamente
rate e ren
ndo grup
to costru
ISI 1552
di ruote
micamen
za a cuo
ccessiva
o. Dopo
ettifica,
temprate
I metodo
i doppi
durezza
60 e
strato in
n.

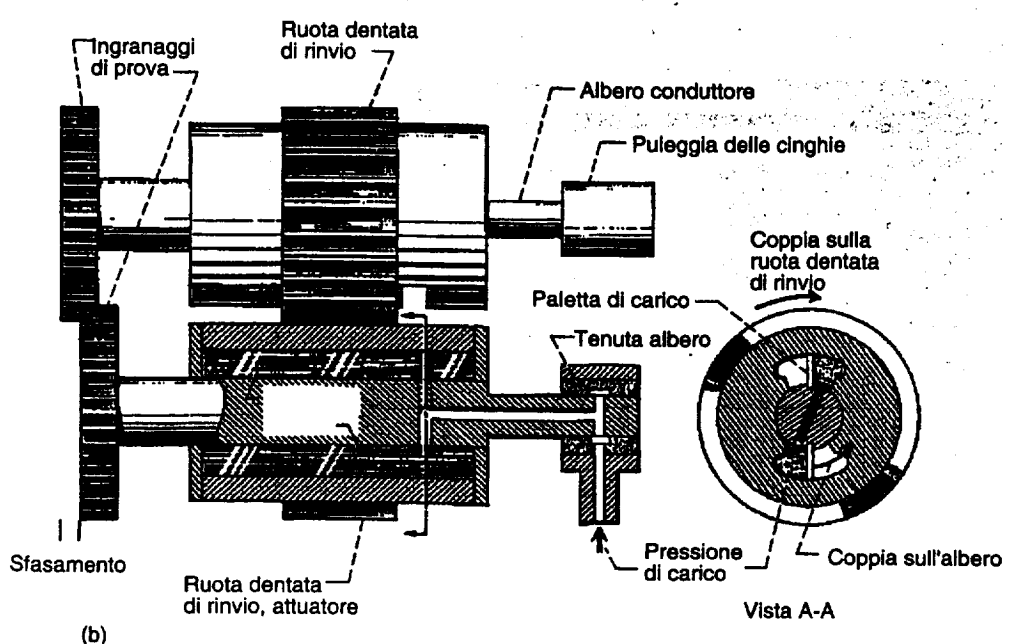
ura,

inaggi

sugli in
te effe
rova in
Resear
ASA (fi
anco di
ncipio
per l'ap
o all'in
; il mo
solo le
el siste
viene
ema di
. L'olio
inviato
o attra
tenuta
si au
e del
carico,



(a)



(b)

Fig. 1 L'apparecchiatura per prove di fatica su ingranaggi del Lewis Research Center della NASA: (a) Vista prospettica. (b) Disegno schematico.

l'ingranaggio applica la coppia nel circuito chiuso. Attraverso gli ingranaggi di prova, questa coppia viene trasmessa all'altro ingranaggio (di rinvio), sul quale la pressione dell'olio mantiene una coppia identica ma di segno opposto. Questa coppia applicata agli in-

granaggi di prova, che dipende dalla pressione idraulica applicata alle palette di carico, carica i denti degli ingranaggi con il valore desiderato della pressione di Hertz. I due ingranaggi di prova sono identici e possono essere avviati a vuoto; il carico può essere

applicato gradualmente senza modificare la zona di ingranamento sui denti degli ingranaggi. Sono previsti impianti di lubrificazione separati per gli ingranaggi di prova e per quelli di rinvio. I due impianti di lubrificazione sono separati sugli alberi della

TABELLA 1 - COMPOSIZIONE CHIMICA NOMINALE DEGLI ACCIAI PER INGRANAGGI AISI 9310 E AISI 1552

Elemento (%)	AISI 9310	AISI 1552
Carbonio	0,1	0,51
Nichel	3,22	-
Cromo	1,21	-
Molibdeno	0,12	-
Rame	0,13	-
Manganese	0,63	1,35
Silicio	0,27	-
Zolfo	0,005	0,03
Fosforo	0,005	0,03
Ferro	resto	resto

cassa ingranaggi mediante tenute a labirinti pressurizzate. Come gas di tenuta si usa l'azoto. Il lubrificante degli ingranaggi di prova

TABELLA 3 - TRATTAMENTO TERMICO DEGLI INGRANAGGI IN AISI 1552

Fase	Processo	Temper. (°C)	Tempo (ore)	
1	Riscaldamento in aria	844	2	
2	Spegnimento in olio caldo	60	—	
3	Rinvenimento per ottenere Rc 34-38	538	2	
4	Rettifica di finitura	—	—	
Tempra a induzione a doppia frequenza			Potenza	
5	Preriscaldamento a 3-10 kHz	413	4 s	120 kW
6	Riscaldamento superficie 230 - 270 kHz	899	0,357 s	330 kW
7	Spegnimento immediato in acqua	33		

viene filtrato con un filtro in fibre di vetro da 5 µm nominali. Il lubrificante di prova può essere riscaldato con un riscaldatore elettro-

co a immersione. La temperatura del riscaldatore viene regolata per prevenire il surriscaldamento del lubrificante di prova.

Sulla cassa è montato un trasduttore di vibrazioni che viene usato per arrestare automaticamente il banco di prova quando compare danneggiamento per fatica sulla superficie dei denti. Il banco prova viene arrestato automaticamente anche in caso di caduta della portata di olio, sia agli ingranaggi di rinvio che agli ingranaggi di prova, in caso di surriscaldamento dell'olio degli ingranaggi di prova e di caduta della pressione del gas di tenuta. Il banco prova è azionato da un motore a velocità variabile attraverso una trasmissione a cinghie. La velocità di lavoro per le prove descritte in questo articolo era di 10.000 giri/min.

Materiali di prova

Un gruppo di ruote dentate di prova è stato costruito in acciaio da fusione sottovuoto con elettrodo ann-

TABELLA 2 - TRATTAMENTO TERMICO DEGLI INGRANAGGI IN AISI 9310

Fase	Processo	Temper. (°C)	Tempo (ore)
1	Pre riscaldamento in aria	-	-
2	Cementazione	899	8
3	Raffreddamento in aria a temperatura ambiente	-	-
4	Piastra di rame sovrastante	-	-
5	Riscaldamento	649	2,5
6	Raffreddamento in aria a temperatura ambiente	-	-
7	Austenitizzazione	844	2,5
8	Spegnimento in olio	-	-
9	Raffreddamento sotto zero	-93	3,5
10	Doppio rinvenimento	177	2 cad.
11	Rettifica di finitura	-	-
12	Ricottura di distensione	177	2



gato AISI 9310, proveniente da un'unica colata. Questi sono stati cementati con durezza superficiale Rockwell C pari a 61 e profondità dello strato indurito di 0,97 mm. Il secondo gruppo di ruote è stato costruito in acciaio AISI 1552 e temprato in superficie per induzione a doppia frequenza a una durezza superficiale Rc 60 e profondità di 0,635 mm. La durezza del cuore era Rc 34-38. Le composizioni chimiche degli acciai AISI 9310 e AISI 1552 sono riportate in tabella 1. Le ruote dentate in AISI 9310 sono state cementate e trattate termicamente con il processo illustrato in tabella 2. Le ruote dentate in acciaio AISI 1552 sono state trattate termicamente, come indicato in tabella 3, per ottenere la durezza a cuore prima della rettifica di finitura. Sono state quindi rettificate e temprate per induzione riscaldando la superficie dei fianchi dei denti con un sistema a doppia frequenza come illustrato in tabella 3 e raffreddate immediatamente per induzione per ottenere la profondità e la durezza dello strato superficiale. La figura 2 è una sezione trasversale della ruota dentata in acciaio AISI 1552 in cui si vede la zona superficiale indurita attorno ai denti. Le ruote non hanno subito

nessuna operazione di finitura dopo il processo di tempra per induzione. Le figure 3 (a), (b) e (c) sono micrografie della sezione trasversale chimicamente attaccata e lucidata dei denti, nelle quali si vede la microstruttura dello strato superficiale, dell'interfaccia strato superficiale/nocciolo e del nocciolo del materiale AISI 1552 che è martensite rinvenuta. Le figure 4 (a) e (b) sono micrografie della sezione trasversale chimicamente attaccata e lucidata dei denti nelle quali si vede la microstruttura dello strato superficiale e del cuore del materiale AISI 9310.

Ingranaggi di prova

Le dimensioni delle ruote dentate di prova sono riportate in tabella 4. Tutte hanno sulla superficie dei denti una rugosità $R_{aq}=0,4 \mu m$ e un profilo standard a evolvente con angolo di pressione di 20° con smusso di testa pari a 0,013 mm partendo dal punto di contatto unico più estremo. Le ruote di prova in AISI 9310 sono state rettificate dopo il trattamento termico; quelle in AISI 1552 sono state rettificate prima della tempra per induzione a doppia frequenza e non sono state successivamente rettificate. Pertanto non so-

no state rimosse le eventuali deformazioni prodotte dal processo di tempra per induzione. In tabella 5 sono riportate la durezza dello strato superficiale e a cuore delle ruote in AISI 9310 e AISI 1552. La figura 5(a) mostra un profilo della durezza dello strato superficiale indurito dell'ingranaggio di prova in AISI 1552 in diverse posizioni sul dente. La figura 5(b) mostra il profilo della durezza del fianco delle ruote in AISI 9310. La figura 6(a) mostra una tipica curva delle tensioni residue delle ruote di prova in

Fig. 2 Sezione di un ingranaggio di prova in AISI 1552 con strato superficiale indurito tramite induzione a doppia frequenza.

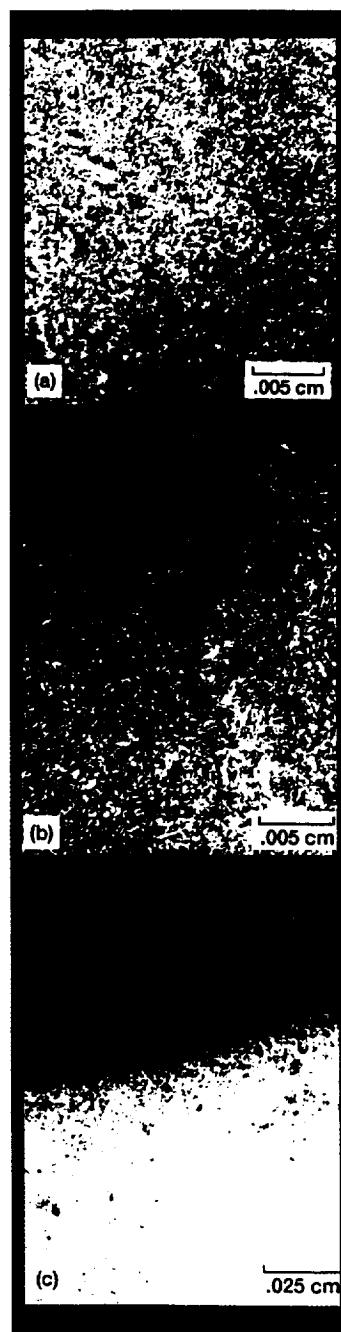
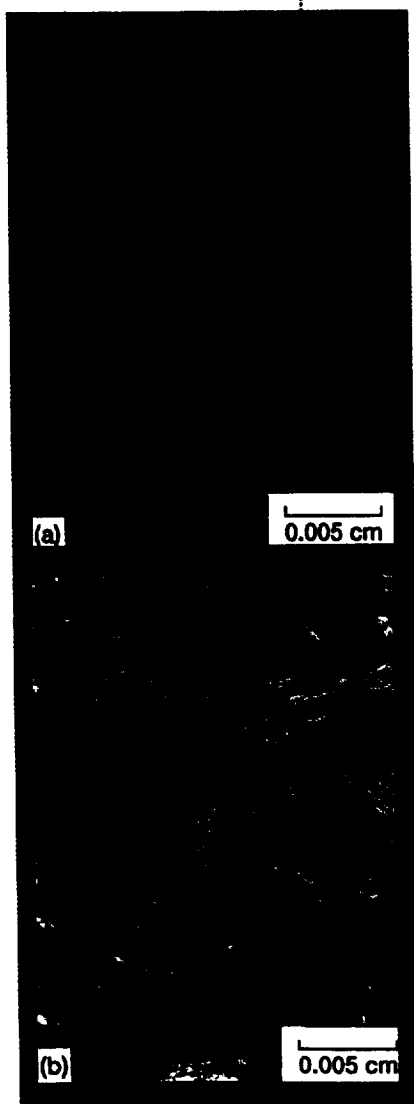


Fig. 3 Micrografie dello strato indurito, del nocciolo e dell'interfaccia strato indurito/nocciolo di un ingranaggio di prova in AISI 1552 temprato tramite induzione a doppia frequenza:
(a) Strato indurito.
(b) Nocciolo.
(c) Interfaccia strato indurito/nocciolo.

Fig. 4 Micrografie dello strato indurito e del nocciolo di una ruota dentata di prova in AISI 9310: (a) Strato superficiale cementato e temprato di un ingranaggio in AISI 9310; si vede la struttura martensitica ad alto tenore di carbonio a grana fine. (b) La struttura del nocciolo di una ruota dentata in AISI 9310; si vede la granulometria austenitica affinata a basso carbonio.



AISI 9310 cementate, temprate e rettifiche. La figura 6(b) mostra una tipica curva delle tensioni residue di ruote di prova in AISI 1552 temprata per induzione a doppia frequenza.

Lubrificante di prova

Tutti gli ingranaggi sono stati lubrificati con un olio sintetico paraffinico. Le proprietà fisiche di questo lubrificante sono riassunte in tabella 6. Al lubrificante è stato aggiunto il 5% in volume di un additivo EP, denominato Lubrizol 5002, la cui analisi chimica parziale è riportata in tabella 6.

Procedure di prova

Dopo essere state pulite per asportare il film protettivo, le ruote di prova sono state montate sul banco prova. Esse erano larghe 6,35 mm e sono state provate in posizione sfalsata, con una sovrapposizione di 3,0 mm ottenendo una superficie di carico sul fianco del dente di 2,8 mm, tenendo conto dell'arrotondamento dello spigolo della dentatura. Se si provavano entrambi i fianchi degli ingranaggi, si potevano effettuare quattro prove a fatica per ogni gruppo di ruote. Tutte le prove sono state effettuate con un carico sulla primitiva di 122,5 N/mm per 1 ora e ha prodotto una pressione di Hertz massima di 756 MPa. Il carico è stato quindi aumentato a 578,4

TABELLA 4 - DATI DEGLI INGRANAGGI CILINDRICI A DENTI DIRITTI (AGMA CLASSE 12.)

Numero di denti	28
Modulo, mm	3,18
Passo circonferenziale, mm	9,975
Altezza totale, mm	7,62
Addendum, mm	3,18
Spessore dente sulla corda (riferimento), mm	4,85
Larghezza dente, mm	6,35
Angolo di pressione, gradi	20
Diametro primitivo, mm	88,90
Diametro esterno, mm	95,25
Raggio di raccordo, mm	1,02 - 1,52
Misura sui perni, mm	96,03 - 96,30
Diametro dei perni, mm	5,29
Gioco di riferimento, mm	0,254
Gioco di testa, mm	0,010 - 0,015

N/mm, che ha dato una pressione di Hertz massima sul primitivo di 1.710 MPa. Con questo carico, la sollecitazione di flessione sul dente è stata di 210 N/mm², assumendo una situazione di flessione semplice. Tuttavia data la presenza di un carico sfalsato, alla sollecitazione di flessione sul dente è stata imposta una sollecitazione aggiuntiva. Combinando i momenti di flessione e di torsione, si ha una sollecitazione massima di 260 MPa. Questa sollecitazione di flessione non comprende gli effetti dello smusso di testa che a sua volta aumenterebbe la sollecitazione di flessione, dato che sposta il carico su un punto di contatto singolo più alto. Con gli ingranaggi di prova in rotazione a 10.000 giri/min, la velocità sulla primitiva era di 46,55 m/s. Il lubrificante è stato erogato all'imbocco dell'ingranamento con una portata di 0,8 litri/min alla temperatura di 46±6 °C. La temperatura del lubrificante all'uscita era all'incirca costante a 77 ±3 °C. Le prove sono state effettuate in continuazione (24 ore al giorno) finché non venivano interrot-

te automaticamente dal trasduttore di rilevamento delle vibrazioni, situato sulla cassa ingranaggi vicino agli ingranaggi di prova, o non avevano raggiunto la condizione di fine prova (300x10⁶ cicli). Il lubrificante veniva fatto circolare attraverso il filtro in fibre di vetro da 5 µm per trattenere le particelle di usura. Dopo ogni prova il lubrificante e l'elemento filtrante venivano sostituiti. Le temperature di entrata e di uscita dell'olio erano registrate in continuazione su un registratore a carta continua. Lo spessore del film elastoidrodinamico (EDH) sul primitivo è stato calcolato con il metodo descritto in [8]. Per il calcolo dello spessore del film si è assunto che la temperatura degli ingranaggi sul primitivo fosse uguale alla temperatura di uscita dell'olio e che la temperatura di entrata dell'olio nella regione di contatto fosse uguale alla temperatura degli ingranaggi, anche se la temperatura di entrata dell'olio era notevolmente più bassa. Considerando le temperature misurate in precedenza [9], è più probabile che la temperatura della super-

ficie degli ingranaggi fosse ancora più elevata della temperatura di uscita dell'olio, specialmente sui punti finali del contatto. Si è calcolato che in queste condizioni lo spessore EDH del film era di $0,33 \mu\text{m}$, con il quale si aveva un rapporto iniziale tra spessore del film e rugosità superficiale composta h/σ pari a 0,55 alla pressione di Hertz massima sul primitivo di 1.710 MPa.

Risultati e discussione

Un lotto di ingranaggi in acciaio AISI 9310 cementati, temprati e rettificati e un lotto di ingranaggi in acciaio AISI 1552 temprati a induzione a doppia frequenza, sono stati provati a coppie fino ai danneggiamenti o fino a 500 ore di prova senza danneggiamenti. Venti prove sono state effettuate con cinque gruppi di ingranaggi in AISI 9310 e, per risparmiare tempo e costi, solo 10 prove sono state effettuate con quattro gruppi di ingranaggi in AISI 1552. Le condizioni di prova erano un carico tangenziale sul dente di 578,4 N/mm che determinavano una pressione di Hertz massima di 1.710 MPa a 10.000 giri/min. Gli ingranaggi si sono danneggiati per la classica fatica da pitting sottosuperficiale o per rottura del dente a flessione. Si sono avuti diciannove cedimenti e una interruzione per gli ingranaggi in AISI 9310 e cinque cedimenti e cinque interruzioni per gli ingranaggi in AISI 1552. I risultati delle prove sono stati analizzati considerando la durata di ogni coppia di ingranaggi come se fosse un sistema.

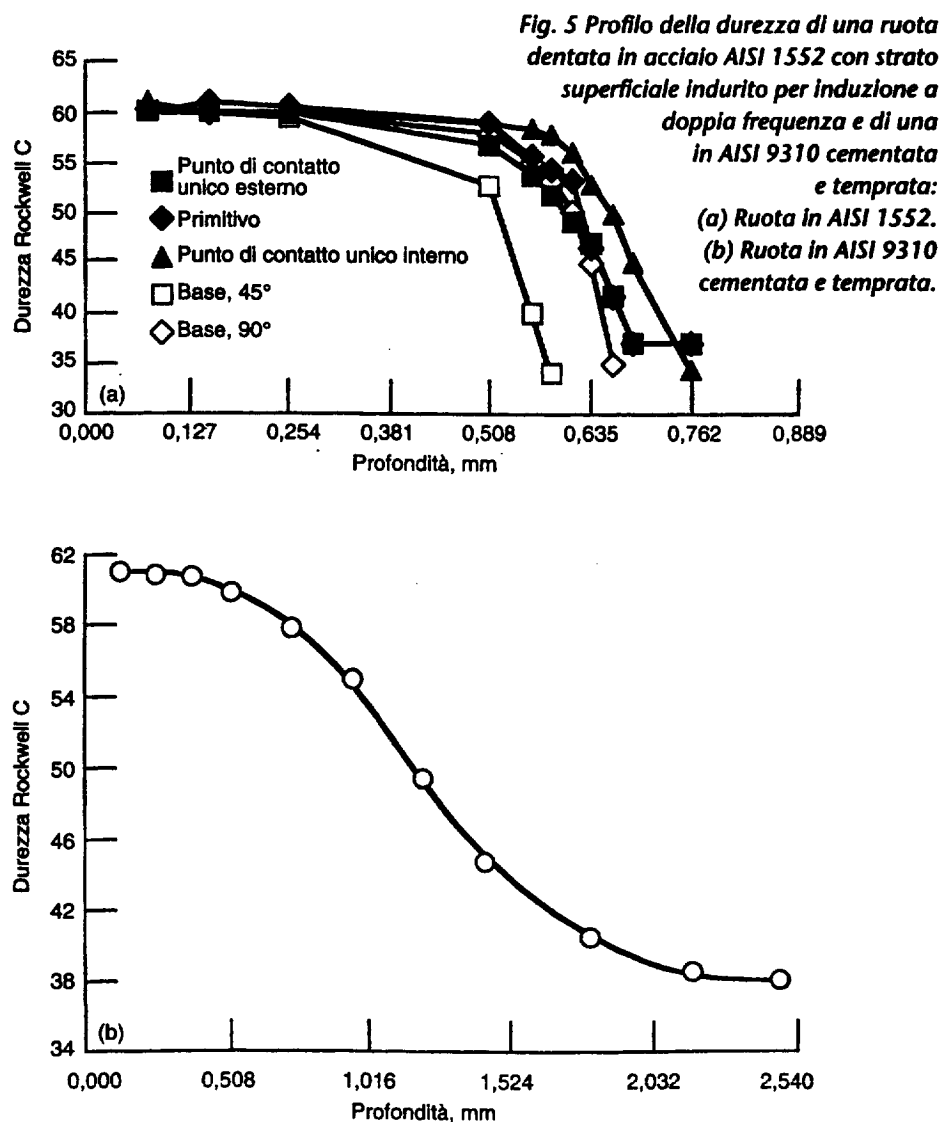
I risultati della durata a fatica da pitting della superfi-

TABELLA 5 - CARATTERISTICHE DELLO STRATO SUPERFICIALE E DEL NOCCIOLO

Materiale	Profondità effettiva dello strato superficiale a Rc 50 mm	Durezza strato superficiale Rc	Durezza nocciolo Rc
AISI 1552	0,63	60,5	35
AISI 9310	0,81	61	38

cie degli ingranaggi in AISI 9310 sono illustrati in figura 7(a). I dati sono stati analizzati con il metodo descritto in [10]. Le durate del 10% e del 50% sono state rispettivamente $20,6 \times 10^6$ e $45,4 \times 10^6$ cicli di sollecitazioni (34 e 76 ore). La pendenza della retta di Weibull era 2,4. L'indice di cedi-

mento (cioè il numero di cedimenti per fatica per numero di prove) è stato di 19 su 20 con una interruzione. Un danneggiamento tipico per fatica superficiale è illustrato in figura 8. Il danneggiamento per fatica dovuto a pitting ha origine sotto la superficie nella regione di massima sollecita-



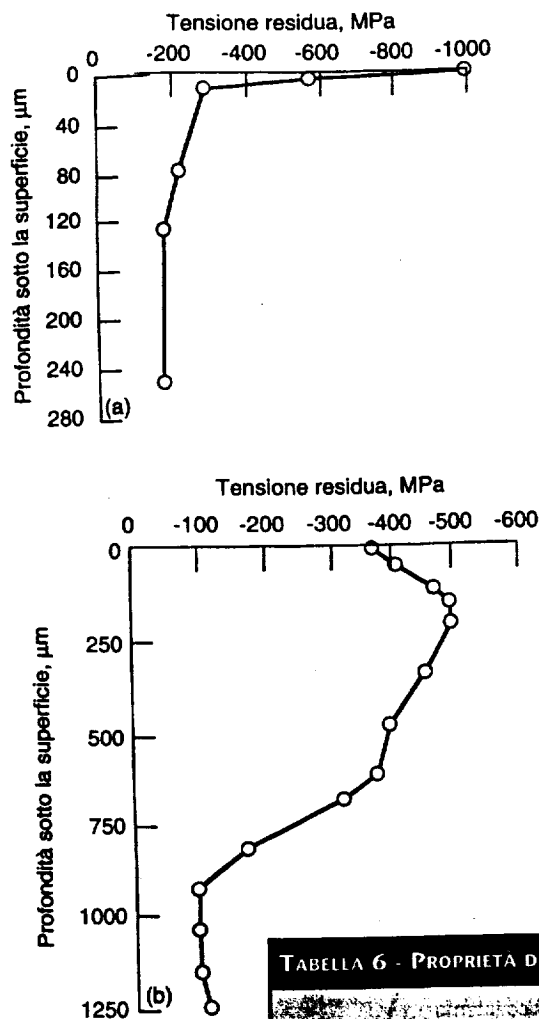


Fig. 6 Tensioni residue in funzione della profondità su ruote dentate di prova in AISI 9310 cementate, temprate e rettifiche e in AISI 1552 temprate a induzione a doppia frequenza. (a) AISI 9310. (b) AISI 1552.

zione a taglio. I risultati della durata a fatica da pitting degli ingranaggi in AISI 1552 temprati per induzione a doppia frequenza sono illustrati in figura 7(b). L'indice di guasto è stato di 5 su 10 con cinque interruzioni. La pendenza della retta di Weibul è stata di 1,035. La pendenza più bassa indica una dispersione maggiore nei dati di cedimento. L'aumento della dispersione dipende di solito dalla maggiore variabilità dei campioni di prova. Un tipico danneggiamento da fatica è illustrata in figura 8(b). Le durate a fatica da pitting del 10% e del 50% sono state rispettivamente di $35,6 \times 10^6$ e 220×10^6 cicli di sollecitazioni (59 e 367 ore). I risultati sono riassunti in tabella 7. Gli ingranaggi temprati per induzione a doppia frequenza hanno presentato

una durata a fatica del 10% che è stata 1,7 volte quella della ingranaggi di prova in AISI 9310. Il livello di confidenza della differenza delle durate è stato del 75%; ciò significa che la differenza è statisticamente significativa.

Riassunto dei risultati

Due gruppi di ingranaggi cilindrici a denti diritti, costruiti in due materiali diversi e con diversi trattamenti termici, sono stati sottoposti a prove di fatica per determinare la durata a fatica da pitting della superficie. Un gruppo è stato costruito in acciaio AISI 1552, rettificato con rugosità $R_{aq} = 0,4 \mu\text{m}$ e quindi sottoposto a tempra per induzione a doppia frequenza. Il secondo gruppo è stato costruito in acciaio AISI 9310 ed è stato cemen-

TABELLA 6 - PROPRIETÀ DEL LUBRIFICANTE SINTETICO PARAFFINICO

Additivo	Lubrizol 5002*
Viscosità cinematica, cm^2/s (cS) a:	
-29 °C	2500×10^{-2} (2500)
38 °C	$31,6 \times 10^{-2}$ (31,6)
100 °C	$5,7 \times 10^{-2}$ (5,7)
204 °C	$2,0 \times 10^{-2}$ (2,0)
Punto di infiammabilità, °C	235
Punto di accensione spontanea, °C	260
Punto di scorrimento, °C	-54
Peso specifico	0,8285
Tensione di vapore a 38 °C, mm Hg	0,1
Calore specifico a 38 °C, $\text{J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$	676

* Additivo Lubrizol 5002 (5% in volume); l'additivo contiene: fosforo, 0,6% in peso; zolfo, 18% in peso.

TABELLA 7 - RISULTATI DELLE PROVE DI FATICA SUGLI INGRANAGGI DI PROVA

Ingranaggi	Durata 10% cicli	Durata 50% cicli	Pendenza	Indice di guasto ^a	Livello di confidenza ^b %
AISI 9310	21×10^6	45×10^6	2,4	19/20	-
AISI 1552	36×10^6	220×10^6	1,04	5/10	75

^a Indica il numero di cedimenti per numero di prove.

^b Probabilità, espressa in percentuale, che la durata 10% con base sugli ingranaggi in AISI 9310 sia inferiore o superiore a quella del particolare lotto di ingranaggi che si considerano.

tato, temprato e rettificato con grado di rugosità $Ra_q = 0,4 \mu m$. Il diametro primitivo degli ingranaggi era di 88,90 mm. Le condizioni di prova erano: pressione di Hertz massima 1.710 MPa, temperatura dell'ingranaggio 77 °C e velocità di 10.000 giri/min. Il lubrificante usato per le prove era un olio sintetico paraffinico con una piccola aggiunta di additivo. Sono stati ottenuti i seguenti risultati:

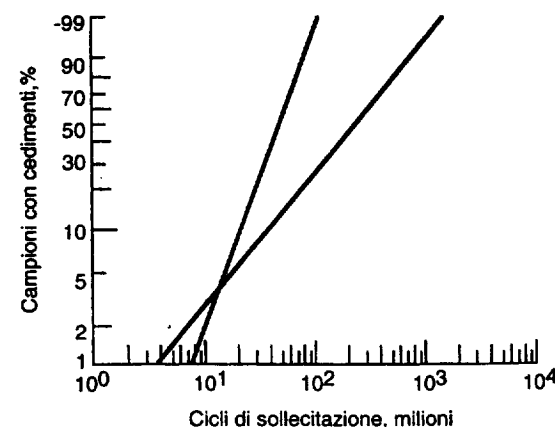
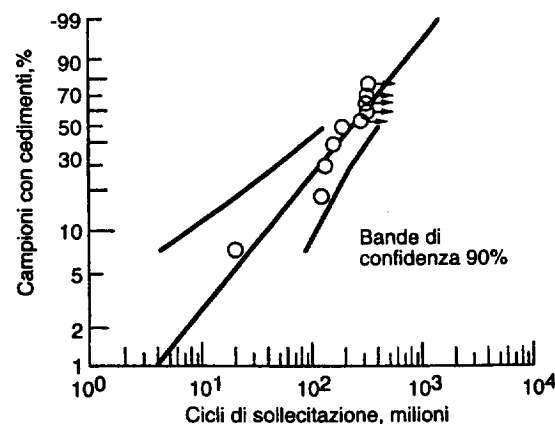
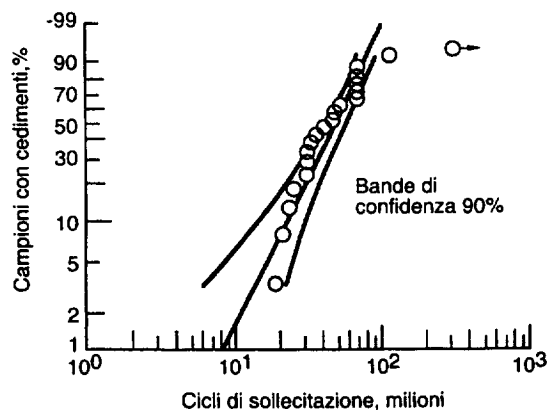
1) Negli ingranaggi di prova in AISI 1552 temprati a induzione a doppia frequenza, la durata a fatica (10%) da pitting della superficie è stata 1,7 volte quella degli ingranaggi di prova in AISI 9310 cementati, temprati e rettificati.

2) Negli ingranaggi in AISI 1552 si sono avuti due cedimenti prematuri per fatica a flessione.

Memoria presentata al FTM '95 dell'AGMA. Ringraziamo l'AGMA per averne permessa la traduzione.

Bibliografia

- [1] Yoshida, A.; Ohue, Y.; and Karasuno, I.: A study of fatigue strenght of induction-hardened sintered powder metal gears. Proceedings of JSME MPT '91 International Conference on Motion and Power Transmissions Nov. 23-26 1991 Hiroshima, Japan pp. 757-762.
- [2] Yoshida, A.; Fujita, K.; Miyanishi, K. and Ohue, Y.: Estimation of fatigue strenght for surface failure of surface-hardened steel rollers and gears. Proceedings of International Conference on Gearing Nov. 5-10 1988 Zhengzhou China Vol. 2, pp. 515-518.
- [3] Storm, J.M.; and Chaplin, M.R.: Dual Frequency Induction Hardening. ASME Proceedings of The 1989 International Power Transmission and Gearing Conference Vol. 2 Chicago Illinois April 25-28, 1989.
- [4] Aida, T. and Oda S.: Bending fatigue strenght of gears. Bulletin of JSME vol. 9, No. 36, 1966 pp. 793-806.
- [5] Kirk, D.; Nelms, P.R. and Arnold, B.: Residual stress and fatigue life of case-carburized gears. Metallurgica, vol. 74, 446, Dec. 1966, p. 255.
- [6] Cretu, S.S.: Influence of compressive residual stresses on ball bearing fatigue life. Bull. of Iasi Polytech. Inst., Rev. Roum. SDci. Techn. - Mecc. Appl., Tome 32, N. 5, pp. 547-560, Bucarest, 1987.
- [7] Townsend, Dennis P.: Improvement in the surface fatigue life of hardened gears by hight intensity shot peening. NASA TM-105678, AVSCOM T91-C-42. Presented at the



Sixth International Power Transmission and Gearing Conference Sept. 13-6 1992.

[8] Dowson, D.; and Higginson, G.R.: Elasto-Hydrodynamic Lubrication. Pergamon Press, 1966, p. 96.

[9] Townsend, D.P. and Akin, L.S., 1981 «Analitical and experimental spur gear tooth temperature as affected by operating variables, Journal of mechanical design, vol. 103, pp. 219-226.

[10] Johnson, L.G.: The statistical treatment of fatigue experiments. Elsevier Pub. Co., 1964.

Fig. 7 Durate a fatica della superficie degli ingranaggi di prova in AISI 9310 e AISI 1552 a strato superficiale indurito. Velocità: 10.000 giri/min; pressione di Hertz massima: 1.710 MPa; temperatura 77 °C; lubrificante: olio sintetico paraffinico con il 5% in volume di additivo EP.
(a) AISI 9310.
(b) AISI 1552.

Fig. 8 Tipico danneggiamento da fatica degli ingranaggi di prova.
(a) AISI 9310.
(b) AISI 1552.

